塔克拉玛干沙漠南缘近地层风温湿廓线与能量交换特征

付光祥[1,2]， 何 清[2]， 王勇辉[1]， 马明杰[1,2]， 阴璐璐[1,2]， 张 乾[3]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院/新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；
3. 民丰县气象局，新疆 民丰 848599）

摘 要： 塔克拉玛干沙漠南缘属于荒漠-绿洲生态过渡区，地表性质时空变化较大，下垫面性质和水热特征均较特别，所以开展该地区微气象要素特征研究对区域未来气候变化的认知具有重要意义。利用青藏高原北侧陆-气相互作用观测站2022年实测气象要素数据，分析了塔克拉玛干沙漠南缘生态过渡区风、温、湿廓线结构、辐射通量及能量交换特征。结果表明：(1) 塔克拉玛干沙漠南缘各季节风速、温度、比湿均随高度上升发生明显变化，其中在温度和比湿廓线中出现了逆温和逆湿现象，逆温层和逆湿层高度均达到了30 m，最大平均风速发生在春季，为6.23 $m \cdot s^{-1}$，最大平均温度和比湿均在夏季，分别为28.93 ℃与6.36 $g \cdot kg^{-1}$。(2) 四季地表辐射平衡以正值为主，各辐射分量峰值大小及出现时间存在差异，其中向下短波辐射受到沙尘天气影响，表现为春季>秋季>夏季>冬季；地表反照率与太阳高度角和土壤湿度呈负相关，其年均值为0.326，12月最大，8月最小，分别为0.366与0.297。(3) 感热、土壤热通量及净辐射四季变化明显，潜热变化平稳，以0 $W \cdot m^{-2}$为中心上下波动，能量消耗以感热为主；四季能量闭合率分别为76%、82%、53%与48%，表现为夏季>春季>秋季>冬季。(4) 有效能量四季变化明显，白天为正值，地面为热源，表明地面向大气输送热量，夜间则相反，表现为春季>夏季>秋季>冬季。研究结果可为未来塔克拉玛干沙漠南缘陆面过程参数化提供科学依据，进而提升对该地区陆面过程的认识。

关 键 词： 生态过渡区；风温湿廓线；辐射平衡；能量交换

文章编号： 1000－6060(2024)01－0068－13(0068～0080)

随着气候变暖和人类生存环境的恶化，当前地球系统科学受到广泛重视，陆面过程作为地球系统科学研究的重要内容，现已成为学界研究的重点对象及前沿领域[1]。从1880年开始，以世界气候研究计划和国际地圈生物圈计划为首的国际性组织进行了50多项以气候和生态为主要研究内容的陆面过程实验[2-3]。中国自20世纪80年代末陆续开展了一系列关于不同地区及不同下垫面陆面过程的科学项目，其中以黑河实验[4]、第二次青藏高原大气科学实验[5]、亚洲季风实验-青藏高原实验[6]、西北干旱区陆-气相互作用实验[7]、淮河流域能量和水分循环实验[8]及内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用实验[9]最具代表性。

沙漠作为下垫面的典型类型，约占地球陆地的1/3，其独特环境和地表能量交换在全球气候变化中扮演重要角色，而且对气候变化响应极为明显[10]。因此，开展沙漠地区陆面过程研究对深入理解干旱区气候变化及形成具有重要意义。中国沙漠地区

收稿日期： 2023-08-23； **修订日期：** 2023-09-24
基金项目： 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk030501)；国家自然科学基金项目(42030612)资助
作者简介： 付光祥(1996-)，男，硕士研究生，主要从事陆面过程研究. E-mail: 18785977302@163.com
通讯作者： 何清(1965-)，男，博士，研究员，主要从事沙漠气象研究. E-mail: qinghe@idm.cn

陆面过程的研究始于新疆气象局沙漠气象研究所于2003年在塔中布设了一系列梯度通量观测系统，基于此，许多学者利用这些观测资料分析了塔中的辐射平衡、能量平衡及风温湿廓线结构等特征[11-15]，得出了“沙漠腹地能量消耗以感热为主、沙漠地区存在逆温逆湿现象”等重要结论，随后关于塔克拉玛干沙漠北缘[16]、古尔班通古特沙漠[17]、巴丹吉林沙漠[18]等地区的陆面过程研究相继开展，伴随着陆面过程理论化越趋成熟，现阶段关于沙漠地区陆面过程的研究多集中于数值模拟[19]、卫星遥感反演[20]等手段，这些研究为学界丰富干旱区陆面过程研究奠定了重要科学基础。但目前关于塔克拉玛干沙漠南缘风温湿廓线结构及能量交换的陆面过程研究较少。

塔克拉玛干沙漠南缘是塔克拉玛干沙漠与昆仑山交接的核心区域，也是生态环境退化和劣变的典型地区，气候特征是降水量小、蒸发量大、风沙天气多[21]，属于荒漠-绿洲生态过渡区，具有独特的下垫面性质和自然水热特征，所以对该区域近地层陆面过程的研究不仅能对该地区预防大风、干旱、沙尘暴等极端灾害天气具有预测作用，也可能使其在地气物质和能量交换方面有着特殊性。因此，本文利用青藏高原北侧陆-气相互作用观测站2022年35 m梯度风温湿、辐射及涡动资料分析该地区风温湿廓线结构及能量交换特征，进而提高对该地区陆面过程的认识。

1　数据与方法

1.1　研究区概况、仪器及资料

青藏高原北侧陆气相互作用观测站(36°44′21″N，83°11′17″E；海拔2275 m)位于塔克拉玛干沙漠南缘，距塔克拉玛干沙漠腹地以南200 km，处于和田地区民丰县叶亦克乡，简称“叶亦克站”。该地区属温带荒漠性气候，气候极其干旱，沙尘天气频发，是全国沙尘日数之最(约280 d)，具有日照时间长、昼夜温差大、降水稀少、高温、潜在蒸发大等特点[21]，年均气温12.3 ℃，年降水量不足40 mm，蒸发量达3104.3 mm。观测环境下垫面为荒漠，周围植被分布稀疏，主要以驼绒藜、裸果木等为主。

为了加强对塔克拉玛干沙漠南缘陆面过程的认识，乌鲁木齐沙漠气象研究所和民丰县气象局于2018年10月在叶亦克站布设了梯度观测、土壤温湿度、土壤热通量、涡动及辐射系统。站点观测设备及型号见表1。本文时间采用地方时，比北京时间晚2 h 28 min。季节划分按3—5月(春季)、6—8月(夏季)、9—11(秋季)、12—2月(冬季)划分。

1.2　资料处理方法

原始风速、温度、相对湿度及辐射数据首先用Loggernet进行格式转换，随后用Excel处理得到。对原始感热和潜热数据用EddyPro进行质量控制和预处理，具体包括对原始数据进行有效性检验、野点去除、延迟时间校正等步骤，最终得到1 h的感热和潜热数据。

比湿(q，g·kg^{-1})计算过程如下[22]：

$$q = 622e/p \tag{1}$$

$$e = E \times \mathrm{RH}/100 \tag{2}$$

$$E = 6.122 \times \exp\left(\frac{17.62 \times T}{243.12 + T}\right) \tag{3}$$

式中：e为水汽分压(hPa)；p为大气压(hPa)；T为大气温度(℃)；RH为相对湿度(%)；E为饱和水气压(hPa)。

净辐射(R_n，W·m^{-2})及地表反照率(α)计算公式如下[23]：

$$R_n = \mathrm{SW}\downarrow - \mathrm{SW}\uparrow + \mathrm{LW}\downarrow - \mathrm{LW}\uparrow \tag{4}$$

$$\alpha = \mathrm{SW}\uparrow / \mathrm{SW}\downarrow \tag{5}$$

式中：SW↓、SW↑、LW↓、LW↑分别为向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射及向上长波

表1　观测仪器及型号

Tab. 1　Observation instruments and models

系统名称	观测要素	型号	生产厂家/国家	观测高度/m
梯度观测系统	风、温、湿	HMP45C	VAISALA/芬兰	0.5、1、2、4、10、20、32
涡动观测系统	感热、潜热	IRGASON	Campbell/美国	10
	三维风速	CSAT3A/B	Campbell/美国	10
辐射观测系统	四辐射分量	NR-01	Kipp&Zonen/荷兰	1.5
	土壤热通量	HFP01	Hukeflux/荷兰	-0.02、-0.05、-0.1、-0.2、-0.4、-0.8

辐射(W·m⁻²)。

地表能量平衡方程为:

$$R_n - G_0 = H + \mathrm{LE} \quad (6)$$

式中:G_0、H、LE分别为地表土壤热通量、感热通量和潜热通量(W·m⁻²)。其中,土壤热通量通过一维热传导方程结合20 cm深处的热通量与10 cm的土壤温度校正到地表,具体计算过程如下[24]:

$$G_0 = G_{20} + \frac{\rho_s C_s}{\Delta t}\sum_{i=Z}^{Z=0}[T(Z_i, t+\Delta t) - T(Z_i, t)]\Delta Z \quad (7)$$

式中:G_0为校正的地表土壤热通量(W·m⁻²);G_{20}为20 cm处的土壤热通量(W·m⁻²);$\rho_s C_s$为土壤体积热容量(1.08×10⁶J·m⁻³·m⁻¹);$T(Z_i, t)$为0 cm、10 cm、20 cm处的土壤温度(℃);Z_i为某层土壤深度(cm),i为土壤层数;t为时间(s);Δt为时间间隔(3600 s);ΔZ为20 cm处土壤深度。

土壤表层温度(T_0)计算公式如下:

$$T_0 = \left(\frac{\mathrm{LW}\uparrow - (1-\varepsilon_g)\mathrm{LW}\downarrow}{\varepsilon_g \sigma}\right)^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad (8)$$

式中:ε_g为比辐射率,取值0.96;σ为斯蒂芬-波尔茨曼常数,取值5.67×10⁻⁸ W·m⁻²·K⁻⁴。

感热通量(H)和潜热通量(LE)通过涡动观测系统实测获得:

$$H = \rho C_p \overline{\omega'\theta'} \quad (9)$$

$$\mathrm{LE} = \lambda\rho\overline{\omega' q'} \quad (10)$$

式中:ρ为空气密度(kg·m³);C_p为定压比热,取值1004.67 J·kg⁻¹;λ为水的蒸发潜热,取值2.5×10⁶ J·kg⁻¹;θ'为位温脉动量;q'为比湿脉动量;ω'为垂直风速脉动量。

2 结果与分析

2.1 32 m铁塔风温湿廓线结构

2.1.1 风速廓线特征 由塔克拉玛干沙漠南缘0.5~32 m四季风速廓线变化(图1)可知,四季风速整体均随高度上升而呈上升的变化趋势,但四季从夜间到早上风速也有随高度上升而出现下降的情况,这可能是因为在夜间空气急剧下降,形成了上层气温高,下层气温低的情况,使得风从下层高压吹向上层低压,因此风速从夜间到早上出现了减弱趋势。各层全年平均风速为3.05 m·s⁻¹,四季平均风速分别为3.59 m·s⁻¹、3.20 m·s⁻¹、3.24 m·s⁻¹与2.54 m·s⁻¹,表

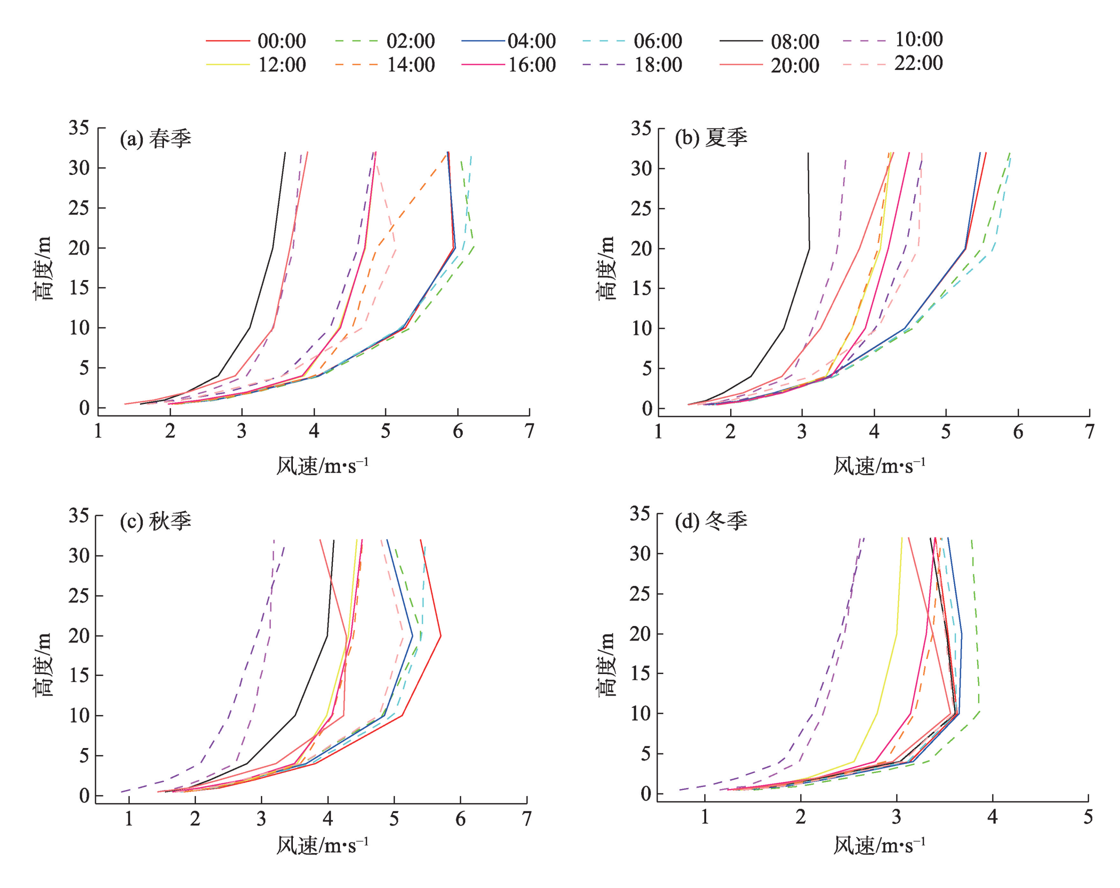


图1 四季风速廓线

Fig. 1 Wind speed profiles in four seasons

现为春季>秋季>夏季>冬季，主要原因可能是春季温度回升较快，导致早晚温差大、气压差大、风力大。四季最大风速梯度分别为6.23 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$、5.88 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$、5.69 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$与3.83 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$，最小风速梯度分别为1.37 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$、1.40 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$、1.44 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$与0.74 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$。

2.1.2　温度廓线特征　由塔克拉玛干沙漠南缘0.5~32 m四季温度廓线结构(图2)可以看出，四季温度廓线昼夜变化特征明显，白天温度均随高度上升呈下降趋势，夜间均出现逆温现象，逆温层厚度可达到30 m以上。四季平均温度分别为13.69 ℃、23.64 ℃、9.16 ℃与−5.44 ℃，表现为夏季>春季>秋季>冬季，这主要受太阳高度角的影响。四季最大温度梯度分别为19.9 ℃、28.93 ℃、15.06 ℃与0.48 ℃，最小温度梯度分别为7.91 ℃、19.11 ℃、3.59 ℃与−10.35 ℃。此外，塔克拉玛干沙漠南缘四季温度廓线与其他干旱地区一样[25-27]，也可分为早晨过渡型、白天辐射型、傍晚过渡型和夜间辐射型4种。春、夏季早晨过渡型略早于秋、冬季，在06:00—08:00出现，白天辐射型在08:00—18:00出现，傍晚过渡型在18:00—20:00出现，夜间辐射型则在20:00—次日06:00出现，两季气温变化基本相似。秋、冬季早晨过渡型出现时间则比春、夏季晚，在08:00—10:00出现，白天辐射型在10:00—16:00出现，傍晚过渡型在16:00—18:00出现，夜间辐射型则在18:00—次日08:00出现。造成这一差异的原因主要是四季太阳辐射多寡不均所致。

2.1.3　比湿廓线特征　根据塔克拉玛干沙漠南缘0.5~32 m四季比湿廓线特征(图3)可知，各季节比湿廓线差异明显，春、夏季比湿廓线变化特征相似，整体均呈随高度升高比湿减少的趋势，但秋、冬季比湿昼夜变化特征明显，秋季夜间10 m以上出现逆湿，冬季则2 m以上，逆湿层厚度最大可达30 m。该地区各季节平均比湿分别为2.51 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$、5.91 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$、2.34 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$与1.13 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$，表现为夏季>春季>秋季>冬季，造成这一差异的原因主要是该地区降水主要集中在夏季(表2)，使得空气湿度大，比湿相较于其他季节大。四季最大比湿梯度分别为2.73 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$、6.36 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$、2.52 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$与1.27 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$，而最小比湿梯度分别为2.35 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$、5.48 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$、2.20 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$与1.01 $\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$。此外，该地区比湿各个时刻在1.5 m处均出现拐点。

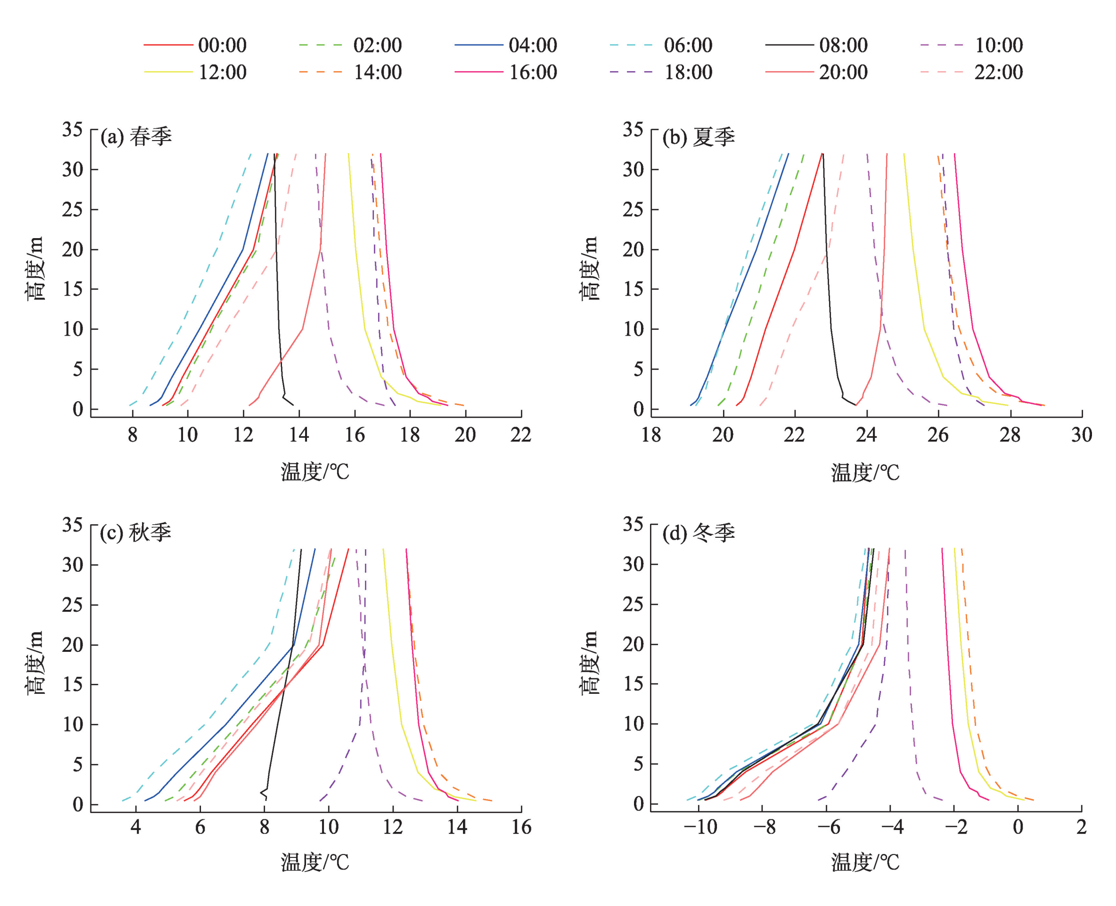


图2　四季温度廓线

Fig. 2　Temperature profiles in four seasons

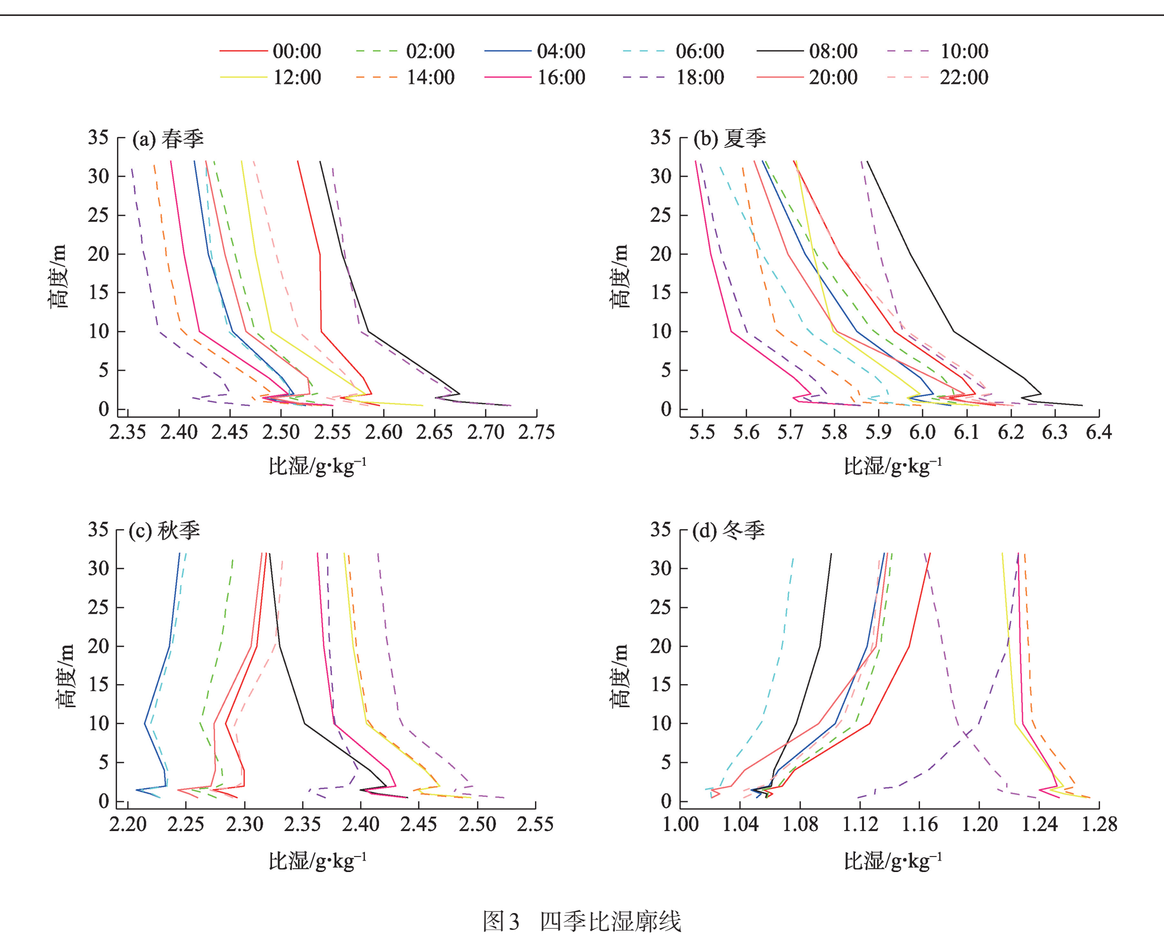


图3 四季比湿廓线

Fig. 3 Specific humidity profiles in four seasons

表2 2022年塔克拉玛干沙漠南缘总降水量

Tab. 2 Total precipitation at the southern edge of the Taklimakan Desert in 2022

月份	日期(年-月-日)	降雨量/mm
1	-	0.0
2	2022-02-06	0.3
3	-	0.0
4	2022-04-15	1.2
5	2022-05-22、2022-05-24、2022-05-25、2022-05-27、2022-05-29	2.9
6	2022-06-10、2022-06-19、2022-06-20	6.6
7	2022-07-14、2022-07-15、2022-07-31	5.8
8	2022-08-01、2022-08-02、2022-08-09、2022-08-13、2022-08-17	3.8
9	2022-09-01、2022-09-25	0.4
10	-	0.0
11	-	0.0
12	2022-12-16、2022-12-30	0.2
总计	-	21.2

2.2 地表辐射平衡特征

2.2.1 四季辐射平衡 由塔克拉玛干沙漠南缘四季辐射平衡平均日变化特征(图4)可以看出,四季地表辐射平衡以正值为主,除向下长波辐射外,其余各辐射分量均呈单峰型变化,但峰值大小及出现时间存在差异。其中,向下短波辐射因受到沙尘天气的影响,季节变化明显,四季均值分别为459.8 W·m^{-2}、419.1 W·m^{-2}、423.9 W·m^{-2}与325.9 W·m^{-2},表现为春季>秋季>夏季>冬季;四季日峰值分别为846.3 W·m^{-2}、714.9 W·m^{-2}、716.5 W·m^{-2}与543.2 W·m^{-2},出现时间与太阳高度角变化规律一致,都在正午12:00达到最大。

向上短波辐射受向下短波辐射的直接影响,各季节变化趋势与向下短波辐射基本一致,季节变化明显,四季均值分别为87.5 W·m^{-2}、78.4 W·m^{-2}、64.8 W·m^{-2}与44.1 W·m^{-2},表现为春季>夏季>秋季>冬季;四季日峰值分别为271.9 W·m^{-2}、225.1 W·m^{-2}、235.3 W·m^{-2}与174.5 W·m^{-2},春季在13:00出现,其他季节均在12:00出现。此外,向上短波辐射还受到下垫面状况和天气现象的影响,虽然向下短波辐射在春季最大,但是向上短波辐射一年中的最大值并没有出现在春季,而出现在冬季的12月17日12:00,为381.9 W·m^{-2},这极有可能受到降雪天气的影响。

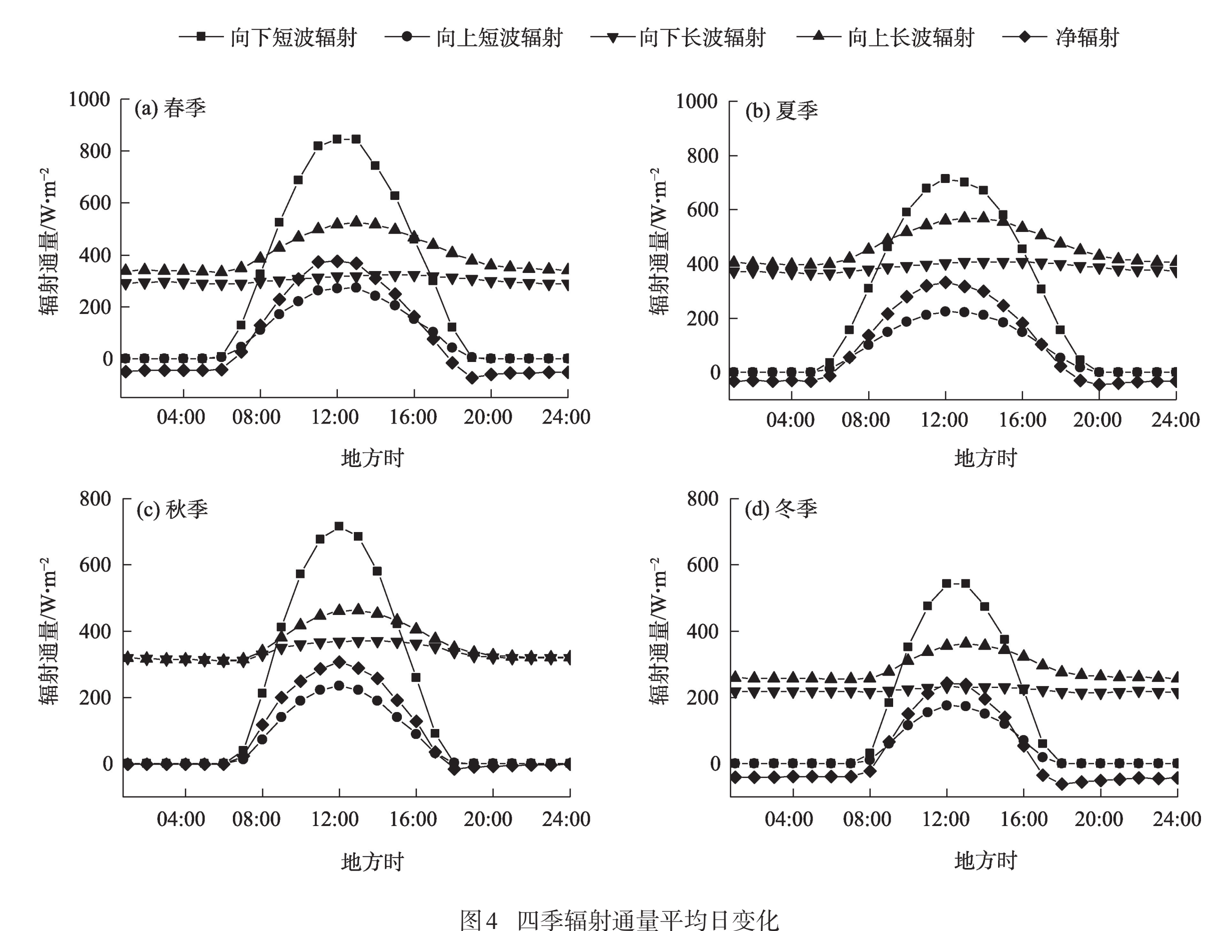


图4　四季辐射通量平均日变化

Fig. 4　Mean diurnal variation of radiant flux in four seasons

向下长波辐射因受大气温度和天气状况影响，各季节大小差异显著，四季均值分别为302.6 W·m^{-2}、385.8 W·m^{-2}、335.6 W·m^{-2}与221.1 W·m^{-2}，表现为夏季>秋季>春季>冬季，主要是因为该地区降水集中在夏季，加之沙尘天气频发，空中云量和沙尘颗粒物增多，大气散射能力增强所致；四季日峰值分别为323.6 W·m^{-2}、407.9 W·m^{-2}、370.1 W·m^{-2}与230.9 W·m^{-2}，春季日峰值出现时间在15:00，其余季节均在14:00出现。

由于沙质土壤白天与夜间升、降温幅度较大，温度变化较为剧烈，所以向上长波辐射季节变幅较为显著，白天变化比夜间变化更为明显，其受地表温度影响极大。四季均值分别为401.4 W·m^{-2}、463.2 W·m^{-2}、361.8 W·m^{-2}与286.5 W·m^{-2}，表现为夏季>春季>秋季>冬季；四季日峰值分别为524.8 W·m^{-2}、568.7 W·m^{-2}、463.1 W·m^{-2}与362.1 W·m^{-2}，出现时间均在13:00，说明该地白天最高温度也在此时出现。

净辐射共同受辐射四分量影响，其变化趋势和各辐射变化较一致，其季节变化在夜间均为负值，白天为正值，这说明夜间能量由地表向大气传输，白天则由大气向地表传输。四季均值分别为81.7 W·m^{-2}、88.5 W·m^{-2}、84.4 W·m^{-2}与26.2 W·m^{-2}，表现为夏季>秋季>春季>冬季；四季日峰值出现时间一致，均在12:00，分别为374.7 W·m^{-2}、331.2 W·m^{-2}、306.7 W·m^{-2}与243.8 W·m^{-2}。

2.2.2　地表反照率变化特征及影响因子分析　地表反照率是影响地表辐射平衡的一个重要参量，其受下垫面性质、天气状况及太阳高度角等因素的影响。由塔克拉玛干沙漠南缘地表反照率变化特征(图5)可以看出，该地区地表反照率年变化曲折，波动大，月均值在12月达到最大，为0.366，最小在8月，为0.297，年均值为0.326。在季节变化上，该地区地表反照率表现为冬季>秋季>春季>夏季，这主要是因为冬季有降雪天气，地面积雪，导致地表反照率骤增，而夏季太阳高度角大，加之有一定降水，土壤湿度较大，使得地表反照率小。四季均呈现出早晚大、中午小的不规则“U”型变化特征。此外，太阳高度角与土壤湿度对地表反照率有明显影响(图6)，地

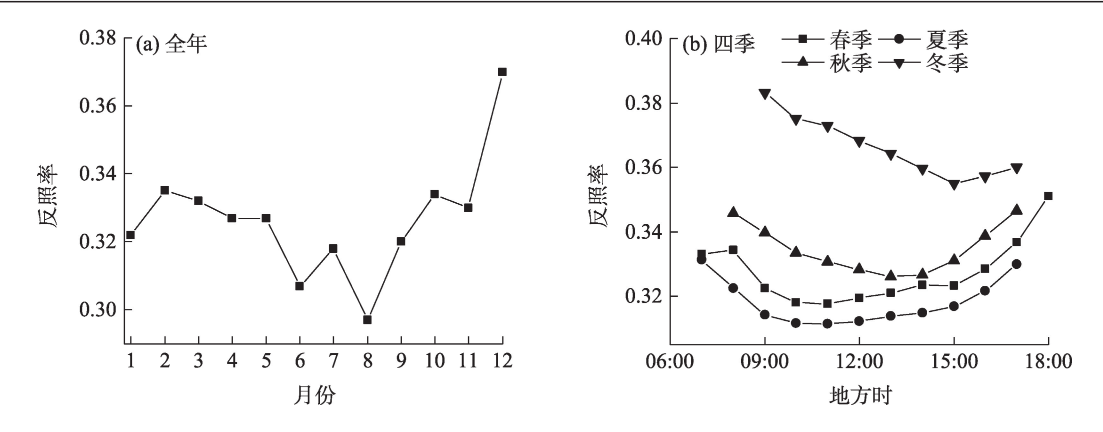


图5 地表反照率季节平均日变化与年变化

Fig. 5 Seasonal mean diurnal variation and annual variation of surface albedo

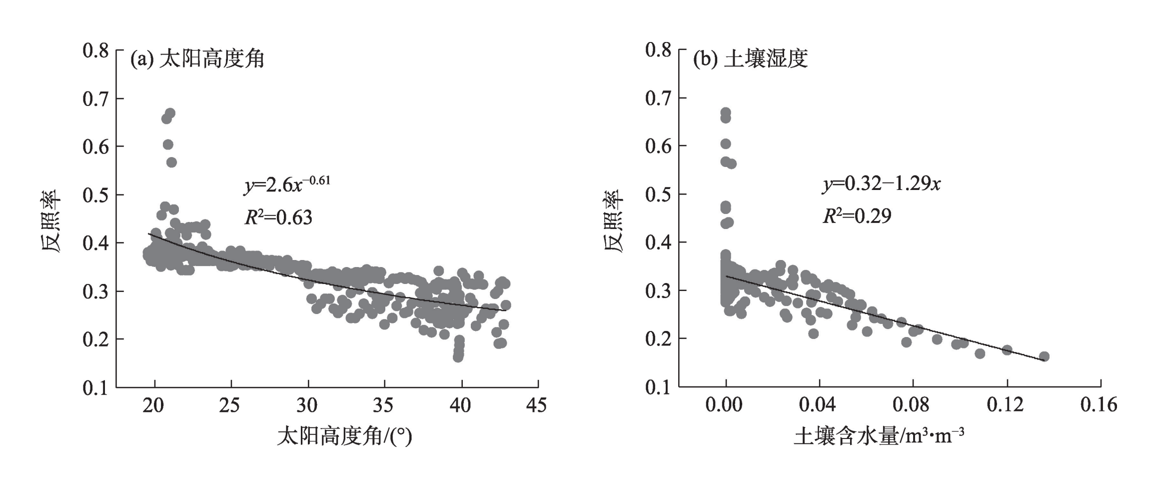


图6 不同影响因子与地表反照率的关系

Fig. 6 Relationship between different influencing factors and surface albedo

表反照率与两者均呈负相关关系，即随着太阳高度角与土壤湿度的增大，地表反照率减小。

2.3 能量通量变化特征

2.3.1 四季能量通量变化 根据塔克拉玛干沙漠南缘能量通量四季变化(图7)可知，沙漠南缘能量消耗以感热为主，感热、土壤热通量、净辐射四季变化特征明显，均表现为春季>夏季>秋季>冬季，潜热变化平稳，以0 W·m^{-2}为中心上下波动，这一特征与塔克拉玛干沙漠腹地一致。净辐射夜间变化不明显，均为负值，白天日出后随太阳辐射增强，并在正午达到最大，变化显著；感热变化趋势与向下短波辐射一致，四季日峰值分别为200.1 W·m^{-2}、158.1 W·m^{-2}、139.7 W·m^{-2}与89.2 W·m^{-2}；土壤热通量四季日峰值分别为168.9 W·m^{-2}、122.1 W·m^{-2}、120.4 W·m^{-2}与91.4 W·m^{-2}。一年中夏季太阳高度角达到最大，地面获得的太阳辐射能量理应越多，但是由于受该地区夏季沙尘天气的影响，导致该地区春季净辐射、感热与土壤热通量稍大于夏季，而冬季太阳辐射弱，地表温度大幅下降，使得三者冬季均小于其他季节。夏季白天潜热有别于其他季节，变化较明显，这与沙漠南缘夏季降水有关。由民丰县气象局提供的气象资料可知，该地区2022年降水量(21.2 mm)在夏季最大，导致该地区夏季近地面水汽含量增加，蒸腾作用加强，潜热增加，能量分配发生改变，但能量消耗依然以感热为主。

2.3.2 四季能量闭合状况 能量不闭合几乎是所有地表通量观测中存在的问题，判断一个区域的能量闭合状况一般都是通过对有效能量与湍流通量进行线性回归分析，回归直线斜率直接代表能量闭合程度。由线性回归结果可知(图8)，塔克拉玛干沙漠南缘四季能量闭合在显著性水平为0.05%的条件下，线性回归斜率分别对应为0.76、0.82、0.53与0.48，决定系数(R^2)分别为0.9、0.88、0.91与0.57，即相应的四季能量闭合率分别为76%、82%、53%与

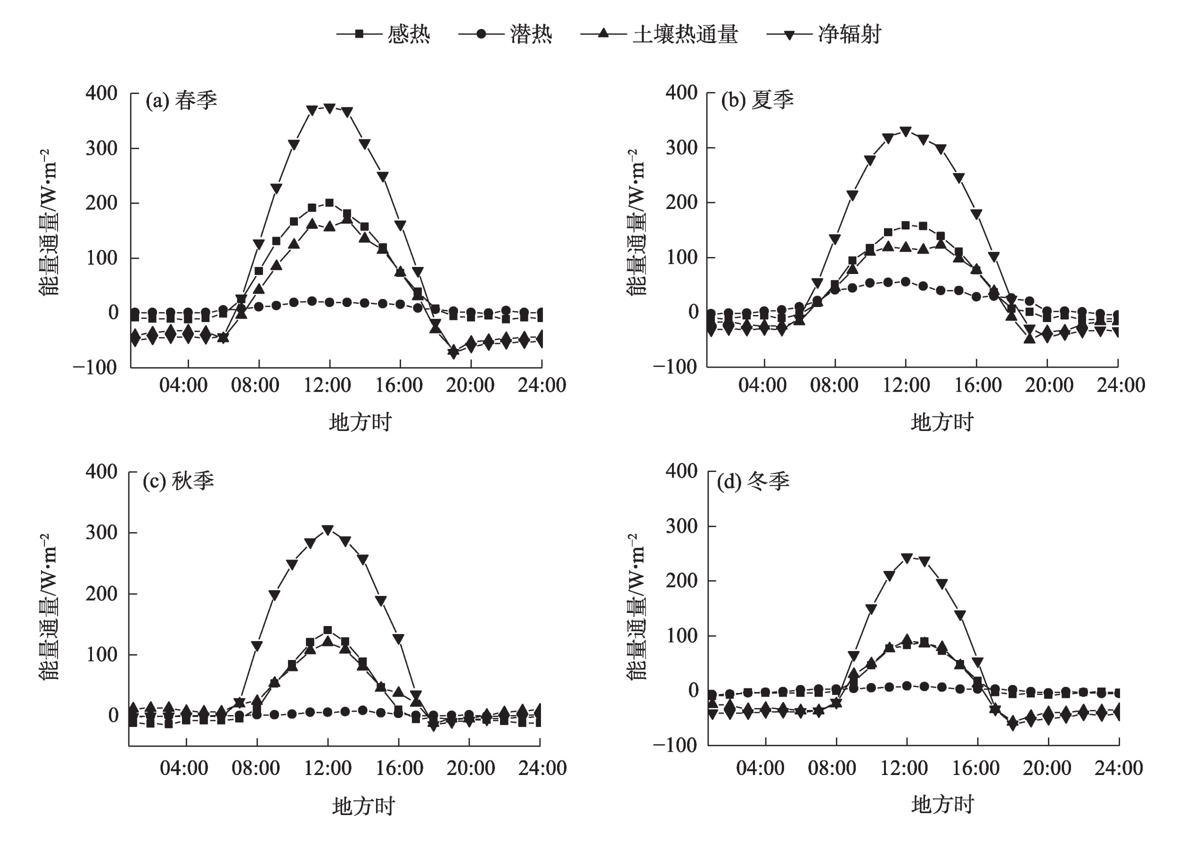


图7　四季能量通量平均日变化

Fig. 7　Mean diurnal variation of energy fluxes in four seasons

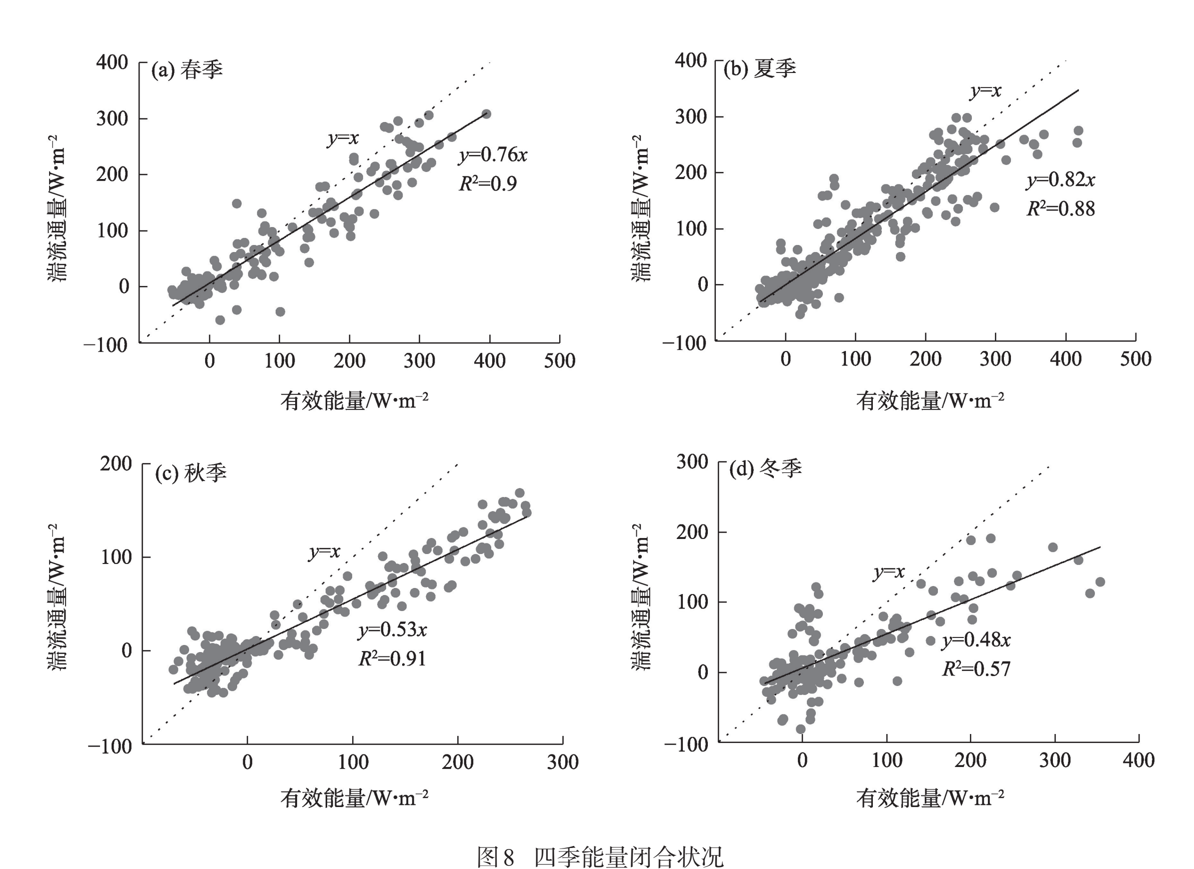


图8　四季能量闭合状况

Fig. 8　Energy closure in four seasons

48%,表现为夏季>春季>秋季>冬季,与塔克拉玛干沙漠腹地一致[28],能量不闭合率整体介于18%~59%之间,除秋、冬季外,春、夏季与大多数生态系统观测的能量不闭合率10%~30%相近。

2.4 有效能量变化

研究塔克拉玛干沙漠下垫面有效能量,对中国西北地区的气候变化具有重要意义。因为湍流过程与辐射过程决定沙漠地区大气的加热作用,即定义净辐射与土壤热通量相减为有效能量,当有效能量>0时,地面向大气输送热能,地面对大气而言为热源;反之,当有效能量<0时,地面对大气而言为冷源[29]。由塔克拉玛干沙漠南缘有效能量季节平均日变化规律可知(图9),该地区有效能量四季变化明显,表现为春季>夏季>秋季>冬季,与塔克拉玛干沙漠腹地一致,其日峰值分别为218.5 W·m^{-2}、213.9 W·m^{-2}、134.8 W·m^{-2}、96.2 W·m^{-2},春、夏、秋季日峰值出现时间均在12:00,冬季则在13:00。此外,各季节白天有效能量均为正值,地面为强热源,变化显著,夜间则相反。早上日出后,塔克拉玛干沙漠南缘有效能量随着太阳高度角逐渐增强,热源强度在12:00达到最大,最大日峰值(218.5 W·m^{-2})在春季,小于塔克拉玛干沙漠腹地(274 W·m^{-2});而在傍晚日落以后,太阳辐射变小甚至消失,有效能量逐渐减弱,变为负值,这时地面就变为弱的冷源。

3 讨论

逆温、逆湿是干旱、半干旱区近地层特有的一种现象,塔克拉玛干沙漠南缘四季夜间均出现逆温,这与大多干旱区是一致的,逆温对抑制沙尘暴具有积极影响,但逆温阻碍了空气的垂直对流运动,妨碍了烟尘、污染物、水汽凝结物的扩散,很有可能会导致该地区的大气污染。该地区逆湿具有特殊性,主要发生在秋、冬季的夜间,而塔克拉玛干沙漠南缘绿洲内部逆湿发生在白天[30],前者很可能是因为秋、冬季该地区气温偏低,但夜间上层气温较下层高,导致空气湿度大于近地面,而后者主要是“绿洲冷岛效应”所致,但沙漠腹地[14]、沙漠北缘[31]、沙漠南缘、巴丹吉林沙漠[27]及鼎新戈壁[32]等不同地区的逆湿是因地理位置、海拔及观测高度不同,使得不同地区逆湿出现的拐点与高度存在差异。

太阳辐射是维持地表温度、地球上大气运动和能量平衡等的主要动力,是人类生产和生活的主要能源。与其他地区一样[33-34],沙漠南缘向下短波辐射一年中的极大瞬时值(1374 W·m^{-2})超出了太阳常数(1367 W·m^{-2})。与其他地区相比,沙漠南缘向下短波辐射季节变化与羌塘高原申扎湿地[35]均有春季大于夏季的特点,前者是沙尘天气所致,后者则是受降水天气影响。除了天气影响外,向下短波辐射还受到太阳高度角、海拔、纬度及地形等因素的影响。如表3中,沙漠南缘向下短波辐射日峰值除了夏季以外,其他季节该地区向下短波辐射日峰值均大于沙漠腹地[36]和鼎新戈壁[32],但在春、夏、冬季小于青藏高原改则和狮泉河地区[37]。导致这一差异的主要原因是由于塔克拉玛干沙漠南缘夏季沙尘天气频发,阻碍地表吸收太阳辐射,使得该地区夏季向下短波辐射小于塔克拉玛干沙漠腹地和鼎新戈壁,青藏高原2个地区(改则、狮泉河)向下短波辐射春、夏、冬三季日峰值大于塔克拉玛干沙漠南缘则主要与海拔有关。

另外,近年来西北气候暖湿化逐渐加剧[38],在这一气候背景下,该地区的温度、相对湿度较多年

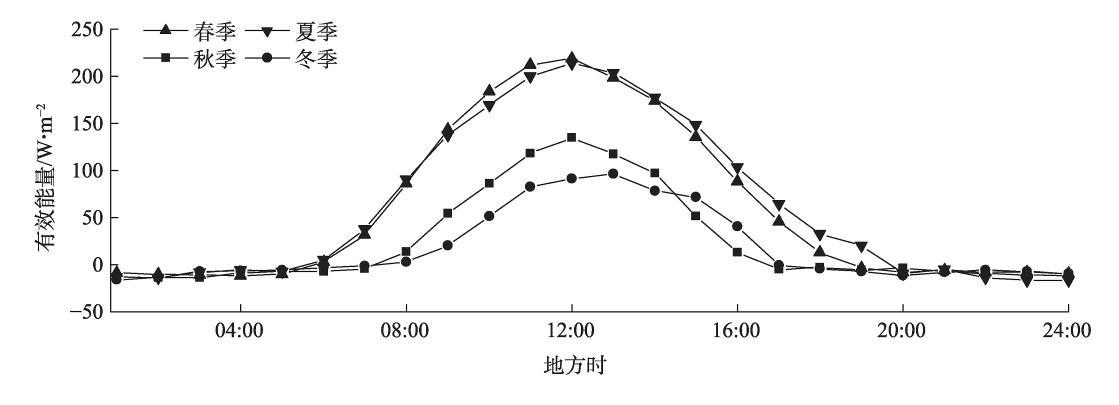


图9　四季有效能量平均日变化

Fig. 9　Mean diurnal variation of effective energy in four seasons

表3　不同地区向下短波辐射日峰值

Tab. 3　Daily peaks of downward shortwave radiation in four seasons in different areas　　/W·m^{-2}

地区	春季	夏季	秋季	冬季
塔克拉玛干沙漠南缘	846.3	714.9	716.5	543.2
塔克拉玛干沙漠腹地	787.2	822.7	687.7	506.0
鼎新戈壁	759.0	828.0	664.0	521.0
青藏高原改则	902.3	906.4	700.3	608.2
青藏高原狮泉河	904.5	980.3	700.6	623.4

前可能明显上升，其增温增湿的特性也有可能使向下短波辐射、感热及潜热增多，而地表反照率受到该趋势影响较多年前很有可能波动越大。但该趋势具有明显的波动性及不确定性[39]，即使在变暖变湿趋势中也会有许多极端天气的发生，所以该趋势对塔克拉玛干沙漠南缘各气象要素的影响持续时间多久或在什么范围也还很难下定论，未来研究中会在这方面投入。

4　结　论

（1）塔克拉玛干沙漠南缘各季节风速、温度、比湿均随着高度上升发生明显变化，其中在温度和比湿廓线中出现了逆温和逆湿现象，逆温层和逆湿层高度均达到了30 m，最大平均风速发生在春季，为6.23 m·s^{-1}，最大平均温度和比湿均在夏季，分别为28.93 ℃与6.36 g·kg^{-1}。

（2）塔克拉玛干沙漠南缘四季地表辐射平衡以正值为主，除向下长波辐射辐射变化平稳外，其余各辐射分量均呈单峰型，但各分量四季均值、峰值大小及出现时间存在差异；地表反照率月均最大值在12月，为0.366，最小在8月，为0.297，年均值为0.326，其中太阳高度角和土壤湿度对地表反照率有明显影响。

（3）塔克拉玛干沙漠南缘能量消耗以感热为主，感热、土壤热通量、净辐射四季变化明显，均表现为春季>夏季>秋季>冬季，潜热以0 W·m^{-2}为中心上下波动，变化平稳；能量闭合率分别为76%、82%、53%与48%，表现为夏季>春季>秋季>冬季；有效能量四季变化明显，白天为正值，地面为热源，地面向大气输送热量，夜间则相反，表现为春季>夏季>秋季>冬季。

参考文献（References）

[1]　王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从HEIFE到IMGRASS和GAME-Tibet/TIPEX[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280–294. [Wang Jiemin. Land surface process experments and interaction study in China: From HEIFE to IMGRASS and GAME-Tibet/TIPEX[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(3): 280–294.]

[2]　Foken T, Wimmer F, Mauder M, et al. Some aspects of the energy balance closure proble[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2006, 6(12): 4395–4402.

[3]　Moderow U, Aubinet M, Feigenwinter C, et al. Available energy and energy balance closure at four coniferous forest sites across Europe[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 98(3): 397–412.

[4]　胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4): 30–34. [Hu Yinqiao. Research advance about the energy balance and transportation of water vapour in the Heihe area[J]. Advances in Earth Science, 1994, 9(4): 30–34.]

[5]　刘辉志, 洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征[J]. 大气科学, 2000, 25(3): 289–300. [Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent characteristics in the surface layer over Gaize area in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 25(3): 289–300.]

[6]　马耀明, 姚檀栋, 王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 344–351. [Ma Yaoming, Yao Tandong, Wang Jiemin. Experimental study of energy and water cycle in Tibetan Plateau: The progress introduction on the study of GAME/Tibet and CAMP/Tibet[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 344–351.]

[7]　张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 427–441. [Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. NWC-ALIEX and its research advances[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 427–441.]

[8]　丁一汇, 胡雯, 黄勇, 等. 淮河流域能量和水分循环研究进展[J]. 气象学报, 2020, 78(5): 721–734. [Ding Yihui, Hu Wen, Huang Yong, et al. The main scientific achievements of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: A historical review[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(5): 721–734.]

[9]　吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用(IMGRASS)综合研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 295–306. [Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmo-

sphere interaction (IMGRASS)[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 295-306.]

[10] Yang T, Wang X Y, Zhao C Y, et al. Changes of climate extremes in a typical arid zone: Observations and multi-model ensemble projections[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D19): 106-124.

[11] 何清. 塔克拉玛干沙漠满西地区夏季太阳辐射特征[J]. 干旱区地理, 1991, 14(1): 74-78. [He Qing. The solar radiation characteristics in Manxi area of Taklimakan Desert during the summer[J]. Arid Land Geography, 1991, 14(1): 74-78.]

[12] Meng C L, Li H Q. Solar radiation partitioning and surface albedo parameterization in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Advances in Meteorology, 2019(10): 9098576, doi: 10.1155/2019/9098576.

[13] 胡列群, 袁玉江. 塔克拉玛干沙漠辐射平衡研究[J]. 干旱区地理, 1996, 19(3): 16-23. [Hu Liequn, Yuan Yujiang. Surface radiation balance in Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 1996, 19(3): 16-23.]

[14] 魏文寿, 王敏仲, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地近地边界层温湿廓线与热量平衡分析[J]. 科学通报, 2008, 59(增刊2): 18-24. [Wei Wenshou, Wang Minzhong, He Qing, et al. Analysis of temperature and humidity profile and heat balance of near-earth boundary layer in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 59(Suppl. 2): 18-24.]

[15] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季晴天近地层温度、湿度和风速廓线特征[J].干旱区地理, 2008, 31(3): 389-396. [Li Xiangyu, He Qing, Mamtimin Ali, et al. Characteristics of temperature, humidity and wind speed velocity profiles in the surface layer in sunshiny day in spring in Taklimakan Desert hinterland[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(3): 389-396.]

[16] 买买提艾力·买买提依明, 缪启龙, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘过渡带紫外辐射和总辐射特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1816-1823. [Mamtimin Mamtili, Miao Qilong, He Qing, et al. Characteristics of global radiation and ultraviolet radiation over desert-oasis transition zone of the transition zone of north Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1816-1823.]

[17] 魏文寿, 董光荣. 古尔班通古特沙漠的辐射热量交换分析[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 3-9. [Wei Wenshou, Dong Guangrong. Analysis on radiant thermal exchange in the surface layer of Gurbantunggut Desert, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(4): 3-9.]

[18] 李建刚, 奥银焕, 李照国. 夏季不同天气条件下沙漠辐射和能量平衡的对比分析[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1443-1451. [Li Jiangang, Ao Yinhuan, Li Zhaoguo. Comparative analysis of radiation and energy balance over Badain Jaran Desert on clear and cloudy days in summer[J]. Progress in Geography, 2012, 31(11): 1443-1451.]

[19] 张淑花, 李新功, 李奇虎, 等. 提孜那甫河流域地表太阳辐射估算及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 734-745. [Zhang Shuhua, Li Xingong, Li Qihu, et al. Estimation of surface solar radiation and analysis of its influencing factors in the Tizinafu River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 734-745.]

[20] 张坤, 刘永强, 阿依尼格尔·亚力坤, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地土壤热通量的陆面过程与卫星遥感研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(20): 256-264. [Zhang Kun, Liu Yongqiang, Yalikun Ayinigel, et al. Land surface process and satellite remote sensing of soil heat flux in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(20): 256-264.]

[21] 曾佳, 郭峰, 赵灿, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘小绿洲近 50 a 来气候变化特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 948-957. [Zeng Jia, Guo Feng, Zhao Can, et al. Climate change of small oasis in the southern margin of Taklimakan Desert in recent 50 years[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 948-957.]

[22] 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 等. 天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5143-5151. [Ding Jing, Tang Yingxiao, Hao Tianyi, et al. Effects of winter air humidity on $PM_{2.5}$ and visibility in Tianjin[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5143-5151.]

[23] Loeb N G, Wang H L, Allan R P, et al. New generation of climate models track recent unprecedented changes in earth's radiation budget observed by CERES[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(5): e2019GL086705, doi: 10.1029/2019GL086705.

[24] 成孝平. 半干旱区地表能量平衡状况[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Cheng Xiaoping. Surface energy balance in semi-arid region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]

[25] 王娟. 塔克拉玛干沙漠塔中地气水热特征分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011. [Wang Juan. Analysis of geo-hydrothermal characteristics in hinterland of Taklimakan Desert[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2011.]

[26] 刘强. 塔克拉玛干沙漠北部肖塘地区近地层微气象特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010. [Liu Qiang. Study on near-stratigraphic micrometeorological characteristics in Xiaotang area of north Taklimakan Desert[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2010.]

[27] 许兴斌, 王乃昂, 梁晓燕, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山近地层温湿廓线与能量交换特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1303-1312. [Xu Xingbin, Wang Naiang, Liang Xiaoyan, et al. Temperature, humidity profiles and heat balance in the megadune surface layer of the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(6): 1303-1312.]

[28] 杨帆, 王顺胜, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射与能量平衡[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1408-1418. [Yang Fan, Wang Shunsheng, He Qing, et al. Surface radiation and energy balance in hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1408-1418.]

[29] 仲雷, 马耀明, 李茂善. 珠穆朗玛峰绒布河谷近地层大气湍流及能量输送特征分析[J]. 大气科学, 2007, 32(1): 48-56. [Zhong Lei, Ma Yaoming, Li Maoshan. An analysis of atmospheric turbu-

lence and energy transport characteristics of surface layer over Rongbu Valley in Mt. Qomolangma area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2007, 32(1): 48-56.]

[30] 毛东雷, 蔡富艳, 李新国, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘策勒流沙前缘与绿洲内部近地面逆温逆湿特征研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 976-985. [Mao Donglei, Cai Fuyan, Li Xinguo, et al. Characteristics of air temperature inversion and relative humidity inversion between the near ground surface in the oasis and the leading edge of shifting sandy land of Cele in the southern margin of Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 976-985.]

[31] 顾军明, 霍文, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘近地层气象要素变化特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 239-247. [Gu Junming, Huo Wen, Mamtimin Ali, et al. Variation characteristics of meteorological elements near surface layer in north of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(2): 239-247.]

[32] 王慧, 胡泽勇, 李栋梁, 等. 黑河地区鼎新戈壁与绿洲和沙漠下垫面地表辐射平衡气候学特征的对比分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 464-473. [Wang Hui, Hu Zeyong, Li Dongliang, et al. Comparative of climatologic characteristics of the surface radiation balance on Dingxin Gobi and Zhangye oasis and desert underlaying surfaces in Heihe Watershed, Gansu[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 464-473.]

[33] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 藏北高原典型草甸下垫面与HEIFE沙漠区辐射平衡气候学特征对比分析[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 453-460. [Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. Comparison and analysis of the climatological features of radiation balance between the grassy marshy and surface of north of the Tibetan Plateau and the desert in HEIFE[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(4): 453-460.]

[34] 岳平, 张强, 邓振镛, 等. 草原生长期地表辐射和能量通量月平均日变化特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 941-947. [Yue Ping, Zhang Qiang, Deng Zhenyong, et al. Monthly mean diurnal variations of surface radiation and energy balance fluxes in grassland during growing season[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 941-947.]

[35] 强耀辉, 王坤鑫, 马宁, 等. 羌塘高原申扎高寒湿地辐射平衡和地表反照率特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1207-1215. [Qiang Yaohui, Wang Kunxin, Ma Ning, et al. Characteristics of the radiation balance and surface albedo of a typical alpine wetland in Qiangtang Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1207-1215.]

[36] 金莉莉, 何清, 买买提艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地辐射平衡和反照率变化特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 215-224. [Jin Lili, He Qing, Mamtimin Ali, et al. Characteristics of the land surface radiation balance and land surface albedo in the Taklimakan Desert hinterland[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 215-224.]

[37] 巩远发, 段廷扬, 陈隆勋, 等. 1997/1998年青藏高原西部地区辐射平衡各分量变化特征[J]. 气象学报, 2005, 76(2): 225-235. [Gong Yuanfa, Duan Tingyang, Chen Longxun, et al. The variation characteristics of radiation budget components of the western Tibetan Plateau in 1997/1998[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 76(2): 225-235.]

[38] 姚旭阳, 张明军, 张宇, 等. 中国西北地区气候转型的新认识[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 671-683. [Yao Xuyang, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. New insights into climate transition in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 671-683.]

[39] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(增刊2): 3757-3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(Suppl. 2): 3757-3771.]

Characteristics of wind, temperature, humidity profiles and energy exchange in the surface layer in the southern edge of Taklimakan Desert

FU Guangxiang[1,2], HE Qing[2], WANG Yonghui[1], MA Mingjie[1,2],
YIN Lulu[1,2], ZHANG Qian[3]

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University/Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang/Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of China Meteorological Administration/Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Minfeng County Meteorological Bureau, Minfeng 848599, Xinjiang, China)

Abstract: The southern edge of the Taklimakan Desert of China belongs to the desert-oasis ecological transition zone, and the temporal and spatial changes in land surface properties are significant. The underlying surface properties and hydrothermal characteristics are unique. Therefore, it is of great significance to investigate the characteristics of micrometeorological elements in this region for future climate change. Based on meteorological element data measured through the land-atmosphere interaction observatory on the northern side of the Tibetan Plateau in 2022, the wind, temperature, and humidity profile structure, radiation flux, and energy exchange characteristics of the ecological transition zone on the southern edge of the Taklimakan Desert were analyzed. The results show the following: (1) The wind speed, temperature, and specific humidity of the southern margin of the Taklimakan Desert change significantly with increasing altitude, and the temperature and specific humidity profiles of the inversion and humidity inversions occur in the temperature and specific humidity profiles, the heights of the inversion layer and the inversion humidity layer reach 30 m, the maximum average wind speed occurs in spring at 6.23 $m \cdot s^{-1}$, and the maximum average temperature and specific humidity are 28.93 ℃ and 6.36 $g \cdot kg^{-1}$ in summer, respectively. (2) The surface radiation balance of the four seasons is mainly positive, and there are differences in the peak size and occurrence time of each radiation component, among which downward shortwave radiation is affected by sand and dust weather, which is manifested in spring>autumn>summer>winter. The surface albedo was negatively correlated with the solar altitude angle and soil moisture, with an annual average of 0.326, with the highest in December (0.366) and the lowest in August (0.297). (3) Sensible heat, soil heat flux, and net radiation changed significantly in the four seasons; the latent heat changed steadily, fluctuating up and down with 0 $W \cdot m^{-2}$ as the center, and the energy consumption was dominated by sensible heat. The energy closure rates of the four seasons were 76%, 82%, 53%, and 48%, respectively, which were manifested in summer>spring>autumn>winter. (4) The effective energy varies significantly in the four seasons, with positive values during the day and heat sources on the ground, indicating that the ground transports heat to the atmosphere, whereas, at night, it is the opposite, exhibiting spring>summer>autumn>winter. These findings can provide a scientific basis for the parameterization of land surface processes in the southern edge of the Taklimakan Desert in the future and improve the understanding of land surface processes in this area.

Key words: ecological transition zone; wind temperature and humidity profile; radiation balance; energy exchange